

## Верификация расчетной модели железобетонных конструкций с комбинированным армированием при работе на осевое сжатие

*Р.О.Красновский<sup>1</sup>, Д.Е. Капустин<sup>1,2</sup>, Л.З. Зейд Килани<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Акционерное Общество «Институт «Оргэнергострой», Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет*

**Аннотация:** Статья содержит результаты верификации конечно-элементной расчетной модели работы на осевое сжатие железобетонных конструкций с комбинированным армированием. Конструкции с комбинированным армированием (с несъемной сталефибробетонной опалубкой) нашли широкое применение при возведении сооружений атомных электростанций. Сталефибробетон, по сравнению с тяжелым бетоном, обладает повышенными прочностными и деформативными характеристиками, за счет чего выполняет функцию несущего элемента, воспринимающего сжимающие и растягивающие усилия. Исследование совместной работы сталефибробетона и тяжелого бетона является перспективным направлением исследований. Разработанная конечно элементная модель железобетонной конструкции с несъемной сталефибробетонной опалубкой с высокой степенью достоверности позволяет определить напряженно-деформированное состояние, перераспределение усилий между элементами сечения и параметры трещинообразования при нагружении. Описанную методику моделирования рекомендуется использовать при исследовании работы подобных конструкций.

**Ключевые слова:** АЭС, несъемная опалубка, испытание конструкций, Ansys, диаграмма деформирования, сталефибробетон, метод конечных элементов.

В настоящее время при возведении сооружений атомных электростанций (АЭС) применяются комбинированные железобетонные конструкции с несъемной сталефибробетонной опалубкой (КЖБК) [1-3], представляющие собой армоопалубочные блоки, в которые после их монтажа укладывают монолитный бетон. Совместная работа сталефибробетонной опалубки (СФБО) с монолитным бетоном обеспечивается адгезией между сталефибробетоном (далее - СФБ) и монолитным бетоном (далее - МБ). Происходит это за счет применения самоуплотняющихся бетонных смесей [4]. Расчет таких конструкций осложняется тем, что СФБ и МБ имеют различные прочностные и деформационные характеристики [5-7], в результате чего на границе материалов при совместном деформировании возникают дополнительные напряжения.

Основные требования к расчету и конструированию КЖБК регламентированы ГОСТ Р 59964-2021 (Комбинированные железобетонные конструкции с несъемной сталефибробетонной опалубкой. Расчет и конструирование). Однако в этом стандарте ряд требований, которые должны обеспечивать совместную работу СФБ и МБ, в силу сложного напряженно-деформированного состояния заданы конструктивно на основании проведенных исследований [2, 7, 8]. В частности, это касается приопорных зон КЖБК, для которых, согласно ГОСТ Р 59964-2021, для предотвращения отслоения плит (листов) СФБО от МБ следует устанавливать стяжки, анкера, тяги на расстоянии от верха (низа) листа, не превышающем 150 мм.

В ГОСТ Р 59964-2021 предусмотрена возможность использования для расчета КЖБК метода конечных элементов (МКЭ). Для оценки возможности использования МКЭ для описания сложного напряженно-деформированного состояния КЖБК нами было проведено сопоставление результатов физического эксперимента и расчета этим методом. Как показали результаты исследований [8-10], современные программные комплексы позволяют эффективно решать представленные задачи.

### **Физический эксперимент**

Для проведения физического эксперимента были выбраны наиболее неблагоприятные условия, а именно - минимально допустимый класс бетона по прочности на сжатие для МБ - В30. При этих условиях, на основании результатов исследований [7], за счет низкой адгезии и высокой разницы физико-механических характеристик СФБ и МБ на границе материалов при совместном деформировании возникают значительные напряжения, приводящие к отслоению опалубки при малых нагрузках.

Физический эксперимент был проведен на комбинированных образцах, моделирующих КЖБК - призмах  $150 \times 150 \times 600$  мм, на двух противоположных гранях которых были установлены листы СФБ, толщиной 18 мм (Рис.1, а). В

верхней и нижней частях образца на расстоянии 25 мм от опорных граней по центру боковых граней с СФБ листами были установлены стяжки из арматурных стержней (из стали А240 диаметром 9 мм).

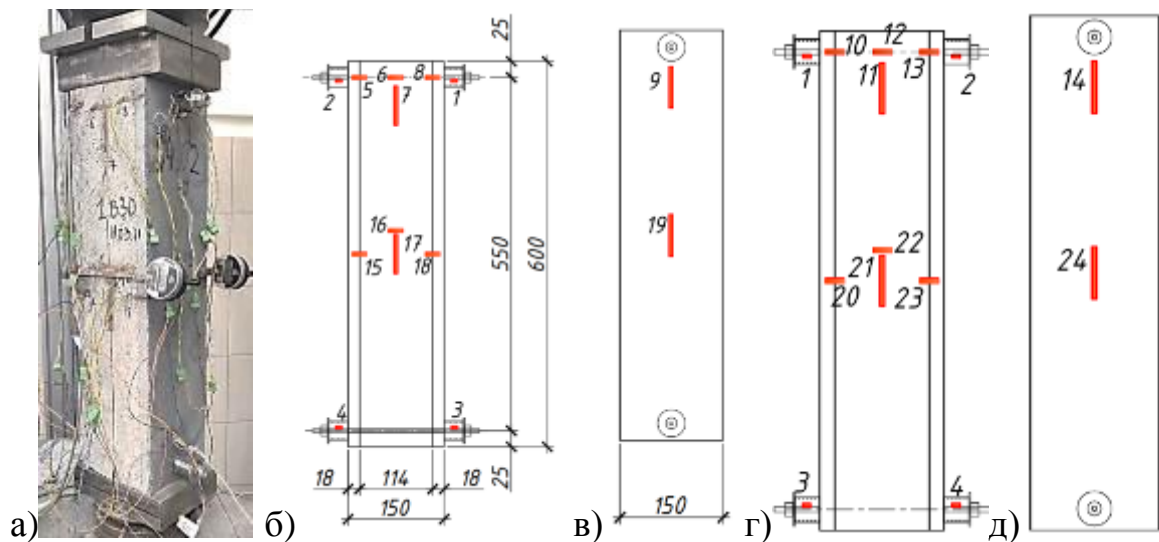


Рис. 1. – Общий вид образца (а) и расположение на нем тензорезисторов (б-д)

Состав и характеристики СФБ были приняты в соответствии с указаниями ГОСТ Р 59964-2021. СФБ был приготовлен с использованием стальной фибры волнового профиля диаметром 0,3 мм и длиной 15 мм в количестве 3 % по объему.

Для оценки напряженно-деформированного состояния в комбинированном образце на его боковые поверхности и на стяжки были наклеены тензорезисторы (Рис.1, б-д). По тензорезисторам на стяжках (1-4) можно было оценить приходящиеся на них усилия. По тензорезисторам (номера 5, 8, 10, 13, 16, 18, 20, 23) на границе СФБ и МБ можно было контролировать совместность работы СФБ и МБ в приопорной зоне и в середине высоты. В середине высоты образца дополнительно были установлены индикаторы, измеряющие расстояние между листами СФБ.

Призмы были испытаны на осевое сжатие по методике ГОСТ 8829-2018 (Изделия строительные железобетонные заводского изготовления. Методы испытания нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и

трещиностойкости). Нагрузку на образец передавали через шаровые опоры и опорные стальные плиты, увеличивая ступенями с шагом 50 кН (7% от ожидаемой разрушающей нагрузки). В процессе испытания вели визуальный контроль процессов трещинообразования на поверхности образцов, обращая особое внимание на зону контакта СФБ и МБ.

Процесс трещинообразования и характер разращения образцов в серии был одинаковым. Первую видимую трещину выявили при нагрузке 500 кН (0,7 от разрушающей) на границе между СФБ и МБ (Рис.2. а), ее длина составляла около 300 мм, ширина раскрытия – до 0,1 мм. Как правило, трещина образовывалась у одного из листов СФБ в приопорной зоне. При дальнейшем увеличении нагрузки ширина этой трещины возрастала (до 0,2 мм при нагрузке 550 кН и до 0,35 мм - при 600 кН). Несмотря на образование трещины, образец воспринимал сжимающее усилие. Разрушение образца происходило с образованием магистральной продольной трещины в монолитном бетоне при полном отслоении СФБ листа. После отслоения сталефибробетонный лист терял устойчивость и разрушался с образованием изломов в середине высоты и в зонах расположения стяжек. Разрушение происходило при нагрузке от 650 до 700 кН (Рис. 2, б).

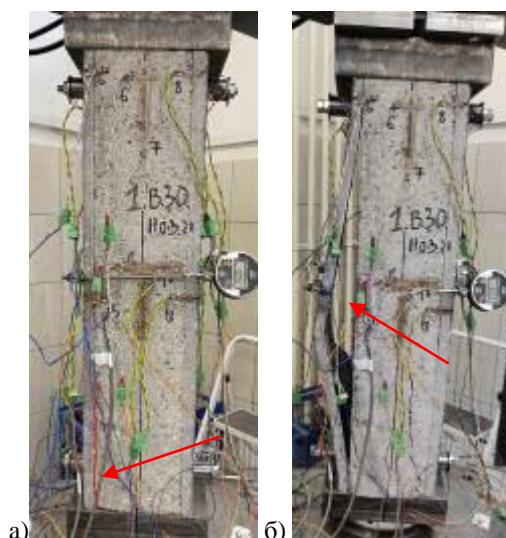
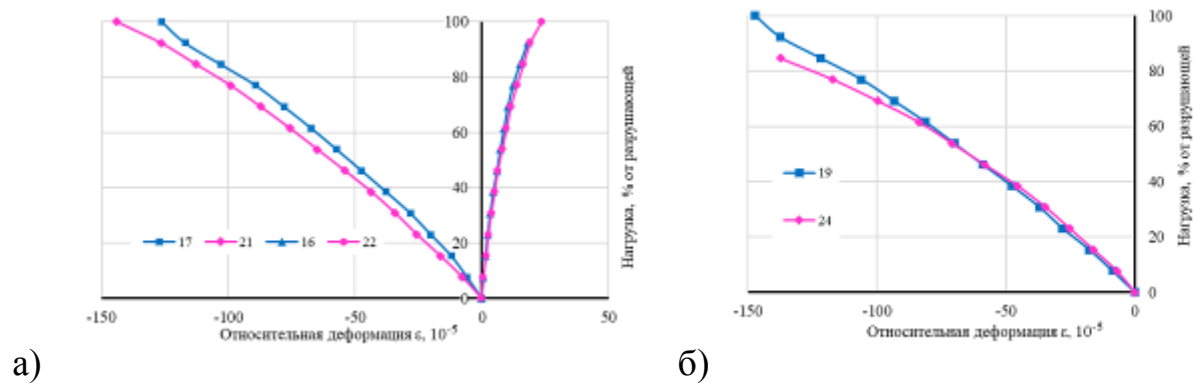


Рис. 2. – а) Первая видимая трещина и б) характер разрушения комбинированного образца

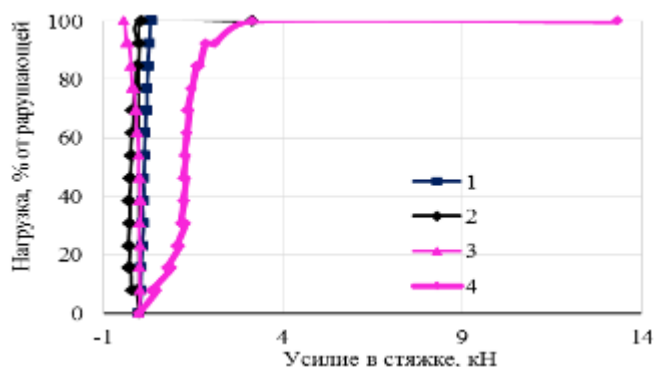
Полученные при проведении эксперимента диаграммы деформирования по тензорезисторам на поверхности МБ и СФБ (Рис. 3) иллюстрирует, что значения деформаций, измеренные на противоположных гранях образцов, практически не различаются, а деформации МБ и СФБ при равных уровнях нагружения имеют близкие значения, т.е. подтверждается гипотеза плоских сечений.



Цифрами указаны номера тензорезисторов (см. Рис.1). Продольные деформации показаны со знаком (-), поперечные (+)

Рис. 3. – а) Диаграммы продольных и поперечных деформаций МБ и б) продольных деформаций СФБ в средней части образца (физический эксперимент)

Измерение продольных усилий в стяжках (Рис. 4) показало, что при увеличении нагрузки на образец усилие в стяжках, практически не возрастает до нагрузки, близкой к разрушающей. Резкое увеличение нагрузки произошло после отрыва СФБ листа. Следовательно, за счет адгезии между МБ и СФБ при наличии стяжек, препятствующих отрыву СФБ листа от МБ на приопорных участках, образец работал, как комбинированная конструкция вплоть до разрушения.



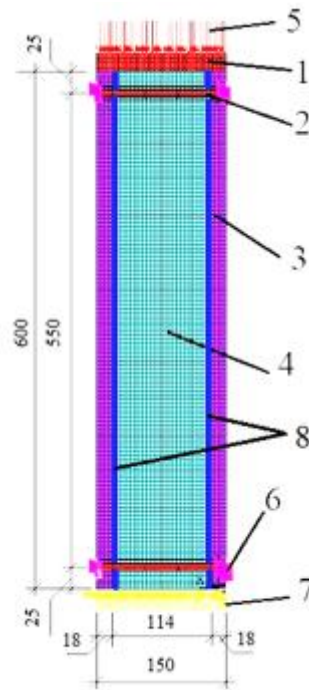
Цифрами указаны номера тензорезисторов (см. Рис.1)

Рис. 4. – Усилия в стяжках

### Численный анализ методом конечных элементов

При определении напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов (МКЭ) был применен программный комплекс ANSYS. Исходя из размеров образца и толщины СФБ, принят размер конечного элемента 5 мм. Модели материалов приняты по аналогии с [4, 11] и включали элементы (СФБ, МБ, стяжки) с размерами и свойствами, соответствующими физическому эксперименту (Рис. 5). При расчете КЭ модель нагружали равномерно распределенной нагрузкой 5, прикладываемой к стальной плите 1 на верхней торцевой грани модели. Нижняя торцевая грань была закреплена по всем степеням свободы 7. Стержни стяжек в модели прикреплены к внешней поверхности СФБ листов с помощью создаваемой на ней жесткой области CERIG (6), диаметр которой соответствовал диаметру опорной шайбы стяжки физической модели. Для возможности моделирования отслоения листов СФБ от МБ было введено понятие о пограничном слое между бетонным массивом и СФБ листом (Рис. 5). Такой слой (толщиной до 1 мм) образуется при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций и их элементов на гранях, прилегающим к бортам формы (так называемый, «пристеночный слой» цементного камня). Его предельные относительные деформации растяжения, независимо от

класса цемента и водоцементного отношения, не превышают  $10 \cdot 10^{-5}$ , тогда как значения предела прочности на растяжение, наоборот, зависят от этих факторов [12].



1 - нагружающая плита пресса, 2 стяжка, 3 - лист СФБ, 4 - бетонный массив;  
5 - равномерно распределенная нагрузка, 6 - связь стяжки с СФБ листом, 7 - жесткое закрепление по всем степеням свободы; 8 - пограничный слой

Рис. 5. – КЭ модель комбинированного образца

МБ и СФБ моделировали элементом SOLID 65, применяемым для моделирования содержащих и не содержащих арматуру объемных тел. Он позволяет учитывать образование трещин при растяжении и сжатии, пластические деформации и деформации ползучести. Элементу назначали значения механических характеристик, полученные в физическом эксперименте при испытании кратковременной сжимающей нагрузкой призм ( $7 \times 7 \times 28$  см) из СФБ и МБ (Таблица №1, Рис 6). В расчетах по КЭ модели для МБ использовали экспериментальную диаграмму деформирования.

Таблица № 1

Характеристики СФБ и МБ при кратковременном сжатии

Характеристика	Значение характеристики для	
	СФБ	МБ
Призменная прочность (прочность при дроблении), МПа	104,7	30,6
Модуль упругости, ГПа	41	26
Коэффициент Пуассона	0,25	0,2

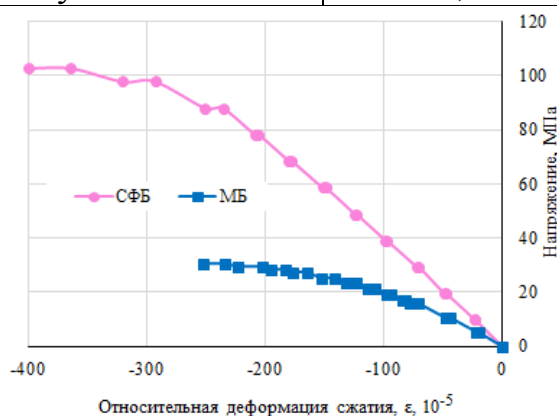


Рис. 6. – Диаграммы продольных деформаций МБ и СФБ при кратковременном нагружении сжимающей нагрузкой

Стальной стержень стяжки моделировали элементом Beam 188, представляющим собой линейный двух узловой пространственный балочный элемент, который пригоден для решения задач с учетом геометрической нелинейности. Сталь опорной плиты моделировали элементом SOLID 185, применяемым для моделирования объемных конструкций. При моделировании стальных элементов была принята линейная модель работы с модулем упругости 210 ГПа и коэффициентом Пуассона 0,3.

На Рис.7-Рис.9 показаны продольные и поперечные деформации в середине высоты образца и на приопорных участках, рассчитанные по КЭ модели и измеренные по тензорезисторам при физическом эксперименте. Поскольку, как было сказано выше, деформации по тензорезисторам на противоположных гранях образца, практически не различались, то на рисунках приведены их средние значения.



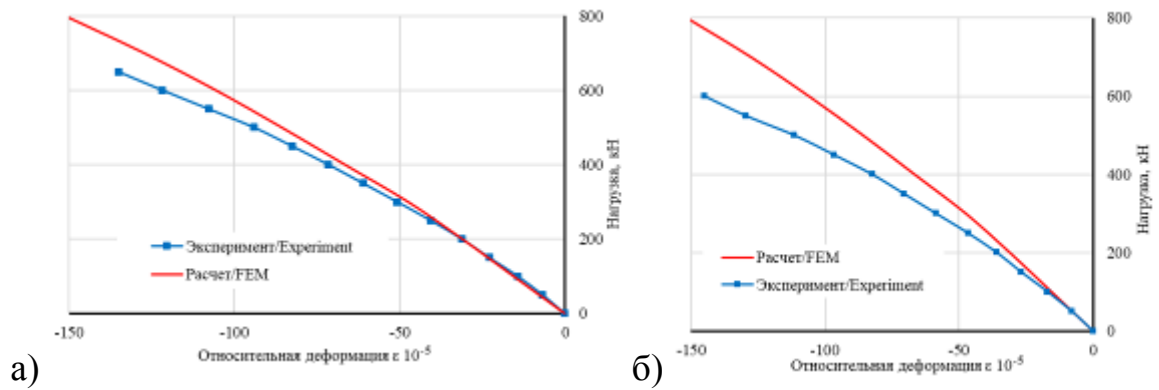


Рис. 7. – Диаграммы продольных деформаций а) МБ и б) СФБ в средней части образца по результатам физического и численного эксперимента

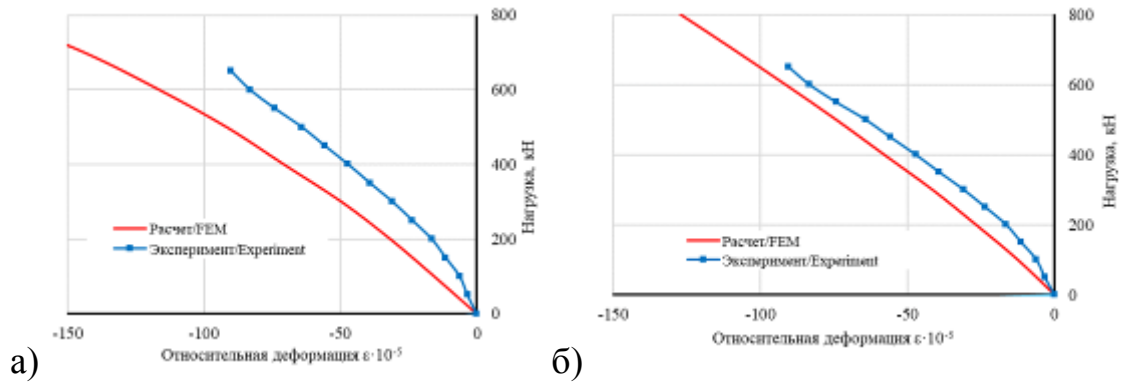


Рис. 8. – Диаграммы продольных деформаций а) МБ и б) СФБ в пропорционной части образца по результатам физического и численного эксперимента

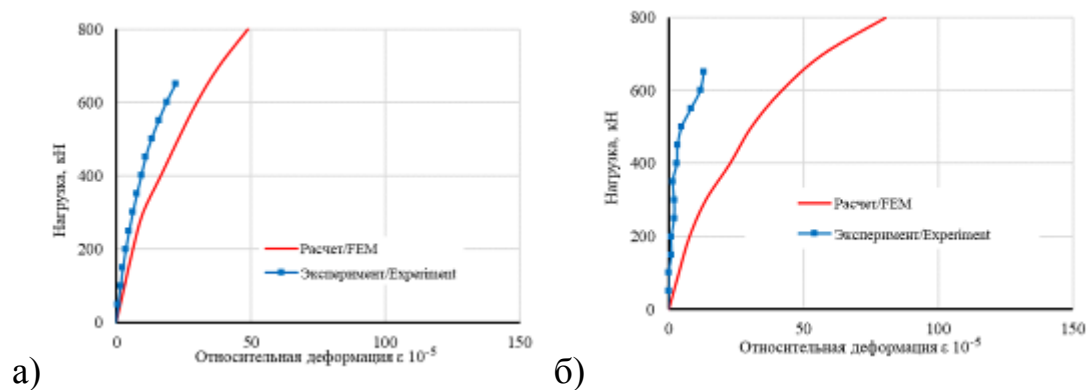


Рис. 9. – Диаграммы поперечных деформаций а) МБ в средней части и б) в пропорционной части образца по результатам физического и численного эксперимента

КЭ модель позволяет моделировать отслоение СФБ листов от бетонного массива. Была проведена оценка процесса образования трещин на границе СФБ-МБ с учетом принятых предпосылок (Рис.10).

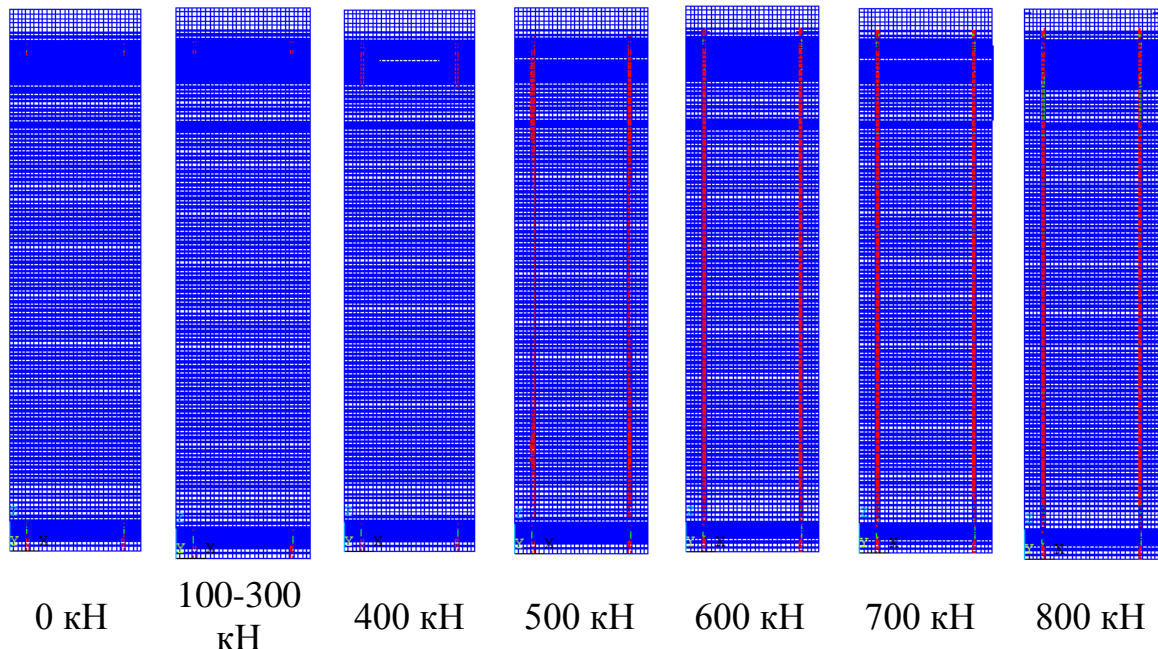


Рис. 10. – Визуализация динамики образования трещин на границе СФБ-МБ при возрастании внешней нагрузки

Наличие трещин при отсутствии нагрузки (0 кН) является следствием моделирования усилия в стяжке. Согласно расчету по КЭ модели, эти трещины не увеличиваются вплоть до нагрузки 400 кН, которую можно считать началом трещинообразования. Трещины образуются в приопорной зоне, и длина их незначительна. После достижения нагрузки 500 кН происходит рост трещины по всей высоте образца, что соответствует отслоению листа. При нагрузке 800 кН по результатам расчета модель уже разрушена, т.е. при 700 кН вся нагрузка передается на бетон.

Сопоставление результатов расчетов по КЭ модели и физического эксперимента показывает, что она позволяет оценить, как качественно, так и количественно, процесс трещинообразования и разрушения комбинированного образца.

В зоне однородного напряженного состояния (в средней части образца) была получена удовлетворительная сходимость характера деформирования и значений деформаций в характерных точках, что говорит о корректной работе КЭ модели.

Сравнение расчетов по КЭ модели с результатами физического элемента позволяет использовать данные, полученные при расчете методом конечных элементов, в элементах и сечениях, в которых не проводились измерения, например, оценить с высокой степенью достоверности напряжения и деформации в теле бетонного массива.

Сходимость результатов расчета и физического эксперимента была достигнута за счет использования нелинейных диаграммы деформирования материалов и введения в модель пограничного слоя бетона с условием разрушения при достижении деформации значений  $10 \cdot 10^{-5}$ . Представленный подход рекомендуется использовать при исследовании напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций с комбинированным армированием.

Следует отметить, что расчет деформированного состояния на приопорных участках не показал достаточной сходимости с экспериментальными данными, что свидетельствует о более сложной работе конструкции на данном участке и требует детального изучения.

### Литература

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции. Монография. М.: Издательство АСВ. 2011. 642 с.
2. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д. Е., Султыгова П.С. На пути к реализации технологии возведения зданий и сооружений АЭС из армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубкой // Строительство в атомной отрасли. 2020. № 1. С. 47-54.

3. Капустин, Д. Е. Технико-экономическое обоснование применения сборно-монолитного метода при строительстве АЭС // Энергетик. – 2015. – № 10. – С. 55-59.
4. Красновский Р.О., Капустин Д.Е., Зейд Килани Л.З. Напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента с несъемной сталефибробетонной опалубкой // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2021. № 2(746). С. 41-51. – DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-41-51.
5. Денисов А.В., Зайцев Д.В. Прогнозирование стойкости сталефибробетонов к термическому воздействию при различных параметрах дисперсного армирования // Инженерный вестник Дона. 2022. №5. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7629](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7629)
6. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Анализ поведения фибробетона, армированного различными видами фибры, под нагрузкой // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: Сборник научных трудов РААСН / Российская академия архитектуры и строительных наук. Том 2. – Москва: Издательство АСВ. 2022. С. 358-363.
7. Капустин Д.Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций. дис. канд. техн. наук. М. 2015. 211 с.
8. Gomez-Serrano J., Espel R., Grima R., Burry M.C., Aguado A. Evolution of the formwork used in the temple of the Sagrada Família Int. J. Architect. Herit., 3 (2) (2009), pp. 93-109.
9. López López D., Roca P., Liew A., Van Mele T., Block P. Tile vaults as integrated formwork for reinforced concrete: construction, experimental testing

and a method for the design and analysis of two-dimensional structures Eng. Struct., 188 (2019), pp. 233-248.

10. Doo-Yeol Yoo, Hyun-Oh Shin, Jun-Mo Yang, Young-Soo Yoon. Material and bond properties of ultra high performance fiber reinforced concrete with micro steel fibers // Composites: Part B. 2014. Vol. 58. P. 122-133.

11. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Strengthening of reinforced concrete beams using ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) // Engineering Structures. 2016. Vol. 106. P. 370-384.

12. Чернышов Е.М., Коротких Д.Н. Опыт системной экспериментальной оценки современных высокотехнологичных бетонов по комплексу критериев сопротивления разрушению // Бетон и железобетон. 2021. № 1(603). С. 30-39.

### References

1. Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersno armirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovanija, tehnologija, konstrukcii [Composites based on dispersed reinforced concrete. Issues of theory and design, technology, designs]. ASV. 2011. 642 p.

2. Dorf V.A., Krasnovskij R.O., Kapustin D. E., Sultigova P.S. Stroitel'stvo v atomnoj otrasli. 2020. № 1. Pp. 47-54.

3. Kapustin, D. E. Jenergetik. 2015. № 10. Pp. 55-59.

4. Krasnovskij R.O., Kapustin D.E., Zejd Kilani L.Z. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Stroitel'stvo. 2021. № 2(746). Pp. 41-51.

5. Denisov A.V., Zajcev D.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. №5.

6. Puharenko Ju.V., Pantelev D.A., Zhavoronkov M.I. Fundamental'nye, poiskovyje i prikladnye issledovanija RAASN po nauchnomu obespecheniju razvitija arhitektury, gradostroitel'stva i stroitel'noj otrasli Rossijskoj Federacii v 2021 godu: Sbornik nauchnyh trudov RAASN / Rossijskaja akademija arhitektury i stroitel'nyh nauk. Tom 2. ASV. 2022. Pp. 358-363.



7. Kapustin D.E. Prochnostnye i deformacionnye harakteristiki nesushhego stalefibrobetonnoj opalubki kak jelementa zhelezobetonnyh konstrukcij [Strength and deformation characteristics of non-removable steel-fiber-reinforced concrete formwork as a bearing element of reinforced concrete structures]. M. 2015. 211 p.
8. Gomez-Serrano J., Espel R., Grima R., Burry M.C., Aguado A. J. Architect. Herit., 3 (2) (2009), Pp. 93-109.
9. López López D., Roca P., Liew A., Van Mele T., Block P. Eng. Struct., 188 (2019), Pp. 233-248.
10. Doo-Yeol Yoo, Hyun-Oh Shin, Jun-Mo Yang, Young-Soo Yoon. Composites: Part B. 2014. Vol. 58. Pp. 122-133.
11. Lampropoulos A.P., Paschalis S.A., Tsioulou O.T., Dritsos S.E. Engineering Structures. 2016. Vol. 106. Pp. 370-384.
12. Chernyshov E.M., Korotkih D.N. Beton i zhelezobeton. 2021. № 1(603). Pp. 30-39.